

Объем производства стальных отливок в нашей стране неуклонно возрастает с 2000 г. (в 2004 г. — 1,3 млн т). По производству отливок РФ занимает третье место в мире после США и КНР [1]. По прогнозу ввода в эксплуатацию новых дуговых печей объем производства стального литья в РФ должен существенно возрасти. Стоимость фасонных отливок очень высока, поэтому их значение в общем объеме валового продукта значительно больше, чем доля их производства в общем объеме производства стали. Многие отрасли промышленности и транспорта без стальных отливок не могут обойтись (например, железнодорожный транспорт).

На металлургических предприятиях также имеется значительное количество малотоннажных печей, главным образом там, где этого требуют ограниченный объем производства стали некоторых марок, необходимость отливки малых слитков и другие особые обстоятельства.

В техническом уровне электросталеплавильного производства при использовании большегрузных печей достигнут за последние десятилетия чрезвычайно большой прогресс. Производительность 100-т дуговых печей увеличилась в 5—7 раз (до миллиона тонн в год и более), удельный расход электроэнергии сократился вдвое. По сравнению с этими показателями прогресс в техническом уровне электроплавки стали в малотоннажных печах, особенно в литейном производстве, ничтожно мал.

Возникает вопрос: "Почему?". Интересно было бы узнать мнение литейщиков по этому вопросу. К сожалению, в трудах последних

съездов литейщиков авторам настоящей статьи не удалось обнаружить докладов, посвященных работе сталеплавильных участков. Может быть недостаток внимания к проблеме (при множестве других проблем) — и есть одна из причин отставания?

Из основных объективных причин отставания "малой" электрометаллургии очевидна одна — при малой массе плавки имеет место более высокий уровень удельных тепловых потерь (примерно пропорциональный удельной поверхности расплава). Это вызывает увеличение расхода энергии, электродов, требует повышения удельной мощности печей для достижения приемлемой длительности расплавления шихты. Металл в ковше остывает быстрее, это требует более сильного предварительного разогрева ковшей и применения современных средств ускорения ковшевых операций.

По-видимому, имеет значение также обслуживающая роль электропечей в литейных цехах (по отношению к основному производству). Печи не могут быть в полной мере "разогнаны" с целью максимального производства стали и минимизации затрат.

Основной путь повышения эффективности малотоннажных печей в настоящее время — это грамотное использование хотя бы некоторых достижений "большой" электрометаллургии стали. К их числу можно, в первую очередь, отнести:

переход от двухшлаковой технологии (с восстановительным периодом плавки) к одношлаковой,

увеличение удельной мощности печей как электрической, так и тепловой неэлектрической

Важным является также выбор предпочтительного рода тока для рассматриваемых агрегатов: переменного или постоянного.

Переход на одношлаковую технологию

В "большой" электрометаллургии почти не осталось печей, работающих по двухшлаковой технологии — с восстановительным периодом плавки (если не считать те, в которых выплавляют высоколегированную сталь и сплавы). Переход к одношлаковому процессу позволяет сократить длительность плавки от выпуска до выпуска на 40—60 мин, что составляет до 50 % длительности всей плавки, т. е. эквивалентно (при высокой вводимой мощности) почти двухкратному увеличению производительности. Кроме этого, при одношлаковом процессе уменьшается содержания водорода и азота в металле, снижается расход электроэнергии, электродов, огнеупоров, извести, раскислителей.

В современных цехах переход на одношлаковую технологию обеспечивается, как правило, проведением раскисления и доводки металла в агрегате ковш-печь (АКП), где, по существу, проводят тот же "восстановительный период", но в более благоприятных условиях — с соответствующим режимом аргонной продувки, с подавлением процессов вторичного окисления, с гораздо более эффективным вводом добавок в виде алюминиевой и порошковой проволоки и т. д. В печи в это время уже идет следующая плавка.

Организация одношлакового процесса выплавки стали с использованием АКП во многих случаях целесообразна и в малотоннажных печах, в том числе в литейных цехах. Возникающие при этом проблемы, связанные с заливкой форм из ковша с шиберным затвором, во многих случаях могут быть решены. Есть, однако, более серьезная проблема — экономическая. Инвесторов понять можно: одно дело — сооружение АКП для обслуживания 100-т печи производительностью 1 млн т стали в год — и совсем другое дело — для обслужи-

вания даже двух печей весьма затруднительно из-за обычной несинхронности их работы и других факторов. Это проверено на опыте работы большой металлургии, от этого стараются уйти и, как правило, уходят.

Таким образом, целесообразность сооружения АКП в цехах с малотоннажными печами — это проблема для тщательного технико-экономического анализа. Это, кстати, относится и к другому современному оборудованию дуговых печей: системе ввода порошкообразного углерода, современным фурмам — горелкам и т. д.

Имеется, однако, возможность реализации одношлаковой технологии электроплавки и без АКП — с доводкой металла в течение 10—15 мин в ковше. Именно так работают (или работали) все мартеновские печи и конвертеры (и при производстве отливок) в цехах без АКП. В мартеновских печах и конвертерах, как известно, проведение восстановительного периода невозможно, поэтому всю доводку металла осуществляют при выпуске и в ковше. Так, например, работали на 10-т мартеновских печах на заводе "Серп и молот", на 10-т мартеновской печи и конвертере (в сочетании с непрерывной разливкой стали!) на Ново-Тульском металлургическом заводе. Более быстрое охлаждение металла в малых ковшах, конечно, сказывается, но при этом имеется достаточная пауза между выпуском и заливкой металла в формы. Все операции укладываются в длительность обычной выдержки металла в ковше после выпуска, которая предусматривается и при двухшлаковой технологии плавки.

Доводку металла в ковше проводят или сразу у балкона печной площадки (где обычно измеряют температуру металла), или на отдельно стоящей установке доводки металла. Последний вариант чаще используют для "большегрузных" плавок, так как он требует несколько более длительной выдержки металла в ковше (установка и взятие ковша, подключение аргона).

Современные средства и способы обработки металла в ковше позволяют провести эту обра-

отсекают);

продувка металла в ковше аргоном;

быстрое проведение химического анализа (3—4 мин от отбора пробы до получения результата);

ввод добавок (алюминий, углерод, силико-кальций и др.) в виде проволоки с помощью трайб-аппаратов.

Использование указанных средств — главное в современной доводке металла в ковше. Место ее завершения не имеет такого большого значения. В настоящей статье оба эти варианта доводки называются доводкой на УДМ.

Независимо от варианта доводки металла после одношлаковой плавки (в АКП или на УДМ) на показатели процесса влияют не только мощность и конструкция электропечи, но и технология периодов расплавления шихты и окислительного рафинирования металла, которая может существенно различаться в дуговых печах переменного и постоянного тока.

Сопоставление печей переменного и постоянного тока

В печах постоянного (ДППТ) и переменного (ДСП) тока аналогичные исполнения основных конструктивных элементов, одинаковые схемы загрузки шихты и выпуска металла, одни и те же технологические процессы плавания и доводки металла, для футеровки используют одни и те же огнеупорные материалы.

Однако имеются и существенные различия в конструкции печей, в составе оборудования и в характере процесса плавки, что вызвано различием физических процессов в дугах постоянного и переменного тока. Учет этих различий позволяет определить зоны наиболее эффективного применения печей ДППТ и ДСП.

В отличие от ДСП печь постоянного тока имеет один вертикально расположенный сводовый электрод, который закреплен в головке электрододержателя и через отверстие в цен-

тровой футеровки по периметру ванны (без локальных перегревов футеровки напротив электродов и более низкой скорости плавления на откосах в промежутках между электродами, характерных для ДСП).

В связи со способностью подовых электродов самовосстанавливаться в процессе плавки и возможностью проведения горячих межплавочных ремонтов подины ресурс непрерывной работы подовых электродов составляет 2—3 тысячи плавок, после чего подовый электрод проходит техническое обслуживание и устанавливается на печь для повторной эксплуатации.

Электрический режим ДППТ обеспечивает снижение уровня колебаний напряжения дуги в период расплавления. Это достигается путем удерживания сводового электрода над уровнем шихты без заглублиения в "колодец". Напряжение дуги по ходу плавки снижается; при этом источник питания соответственно увеличивает силу тока, сохраняя тем самым мощность неизменной (Пат. РФ № 2216883).

Из-за высокой стабильности горения электрической дуги постоянного тока значительно уменьшается уровень шума и колебаний напряжения в сети (фликкер). Уменьшение колебаний давления в рабочем пространстве и возможность лучшей герметизации печи существенно снижают подсос воздуха в печь. Это обеспечивает низкий по сравнению с печами ДСП угар шихты в период расплавления; при этом снижаются пылегазовые выбросы, уменьшается расход электродов. Можно привести в качестве примера данные сравнительных балансовых плавок, проведенных на работающих в одном цехе 25-т ДСП и ДППТ, которые показали [2], что угар металла в ДППТ меньше на 7 % (9,5 и 2,5 %, соответственно), а пылеобразование в период расплавления (по результатам измерений НИОГаза) — меньше на 46,2 кг/ч (соответственно 52,5 и 6,3 кг/ч).

лем проходящего через нее постоянного тока. Использование электромагнитного перемешивания наряду с созданием в печном пространстве малоокислительной атмосферы, дает возможность при переплаве легированных отходов экономней расходовать ферросплавы.

При плавке стали в ДППТ малой и средней емкости по сравнению с аналогичными ДСП уменьшаются: расход графитированных электродов до 0,8—1,5 кг/т стали и менее; угар шихты на 5—7 %; расход ферросплавов на 15—20 % (при переплаве легированных отходов); в несколько раз пылевыбросы; уровень шума на 10—15 дБ; фликкер в питающей энергосистеме; при этом достигается эффективное электромагнитное перемешивание металла.

Для эксплуатации печей решающим является качество проектно-конструкторских решений и изготовления оборудования. Опыт работы на заводе "Ижсталь", где рядом установлены дуговые печи постоянного и переменного тока емкостью 25 т, показывает, что сталевары и подручные, а также механики и электрики предпочитают работу на печи ДППТ, где в процессе плавки и обслуживания печи из-за надежной работы оборудования и стабильности дуг они затрачивают меньше труда, нежели на ДСП.

Особенности технологии плавки

Для более полного использования преимуществ ДППТ надо исключить применение кислорода для ускорения расплавления шихты (не топить печь железом — шихта для этого сегодня слишком дорога). Кислород целесообразно использовать только тогда, когда металл уже расплавлен и не имеет такой развитой поверхности, как шихта, — т. е. для продувки металла (желательно с помощью современной фурмы). Это вариант технологии с умеренной интенсификацией плавки.

Как уже отмечалось, наилучшим с учетом удобства эксплуатации является вариант с использованием комплекса электропечь — АКП, как это принято в современных цехах "боль-

шея наиболее прогрессивной одношлаковой технологии и без АКП — с помощью УДМ.

Технологию с умеренной интенсификацией процесса выплавки стали (простого сортамента — типа 20ГЛ) в малотоннажных дуговых печах без АКП можно характеризовать следующим образом.

В шихту (в бадью или перед подвалкой, а если необходимо, то и в ходе плавки) для совмещения дефосфорации с расплавлением шихты вводят известь и железную руду (или окисленные окатыши) — до 4 % каждого в зависимости от степени удаления фосфора. Ввод добавок в ходе плавки целесообразно осуществлять без отключения печи — через отверстие в своде.

По расплавлении шихты содержание фосфора должно быть существенно ниже заданного, чтобы можно было после спуска шлака больше не заниматься удалением фосфора. Это позволяет с максимально возможной скоростью нагреть ванну и начать обезуглероживание металла. Температура металла к концу интенсивного кипения должна быть выше верхнего предела температуры выпуска плавки.

Кипение ванны для уменьшения угара металла желательно поддерживать присадками руды и извести; если же нужно ускорить процесс, то следует использовать продувку металла кислородом.

По достижении необходимых температуры ванны и содержания углерода можно использовать два варианта окончания плавки. Если в печи можно обеспечить интенсивное перемешивание ванны (как, например, в современных печах постоянного тока), то лучше удалить окислительный шлак и ввести в ванну через отверстие в своде основную массу кремний- и марганецсодержащих материалов и ТШС. Затем на 3—5 мин следует включить печь, расплавить присадку и после этого выпустить плавку в ковш.

В печах переменного тока, где возможность интенсивного перемешивания металла и шлака в печи отсутствует и требуется быстро за-

лительный шлак (и часть металла) в печи. ТШС и основную добавку кремния и марганца вводят при этом на выпуске. Но первый вариант (с удалением шлака и присадкой добавок в печь) — предпочтительнее (если он допустим по условиям работы цеха), так как исключает охлаждение металла на выпуске присадками марганца и кремния и, главное, плавку выпускают со шлаком. Потери температуры на выпуске в этом варианте меньше, а это для малотоннажных плавов очень актуально.

После выпуска проводят доводку металла в ковше в условиях аргонной продувки: отбор и анализ пробы, измерение температуры и окисленности металла, вводят алюминий, проводят корректировку содержания углерода, кремния, марганца, при необходимости — дополнительную десульфурацию силикокальцием.

Оценка целесообразности установки дуговых печей постоянного тока

Существенный недостаток печей ДППТ — они дороже печей ДСП на 10—35 % из-за затрат на полупроводниковый источник питания. Однако в случае необходимости использовать более мощную газоочистку на ДСП, а также фильтрокомпенсирующие устройства для обеспечения заданного энергосистемой качества потребляемой электроэнергии, капитальные затраты для обоих вариантов примерно одинаковы, а в некоторых случаях печи переменного тока оказываются дороже печей постоянного тока.

В каждом конкретном случае необходимо выполнить детальный технико-экономический анализ с учетом всех конструктивных и схемных особенностей ДППТ и ДСП, а также специфики технологического процесса.

В ряде случаев по технико-экономическим показателям выбор типа агрегата практически predetermined. В случае, если сеть электропитания дуговых печей достаточно слабая (мощность короткого замыкания менее, чем в

переплава отходов высоколегированной стали, когда большое значение имеет низкий угар легирующих (на 15—20 % ниже, чем в ДСП). И в том, и в другом случае дополнительные затраты на преобразователь постоянного тока окупаются менее чем за год.

Итак, случаи подключения дуговых печей к маломощным сетям, а также выплавку высококачественной стали можно считать зонами предпочтительного применения печей ДППТ. Для более простой стали при наличии высококачественной питающей сети выбор между ДППТ и ДСП должен быть обоснован технико-экономическими расчетами. При этом большую роль должна играть экономия на удельном расходе металлолома. Если принять угар шихты при плавке в ДППТ на уровне 4 %, а при плавке в ДСП — 10 %, то экономия шихты при плавке в ДППТ составит 60 кг/т. При средней цене 1 т шихты 5000 руб. экономия на шихте составит 300 руб. на каждую тонну выплавленной стали.

Мощность печей и применение энергосберегающих конструкций стен и свода

Современные ДСП работают с максимальной интенсификацией процесса. При очень большой мощности трансформаторов (до 0,9 МВ · А/т) процесс расплавления шихты, как правило, дополнительно интенсифицируют путем использования кислорода и топлива (еще до 0,2 МВт/т). Высокая производительность при этом сочетается, как уже отмечалось, с серьезными недостатками: значительным угаром металла и пылеобразованием.

Для современных ДППТ имеется набор источников электропитания различной мощности, из которого потребитель может выбрать источник, обеспечивающий требуемую производительность при ограниченном использовании кислорода и топлива (с умеренной интенсификацией процесса — без большого угара).

рях на водоохлаждаемых панелях. Это обеспечивается обычно не только оптимизацией конструкций и материалов, но и технологией — применением одношлакового процесса и специальным электрическим режимом, при котором сначала работают на длинных дугах, а затем переходят на короткие.

В малотоннажных печах приходится уделять больше внимания такому фактору, как отрицательное влияние водоохлаждаемых элементов на технологический процесс плавки — на длительность расплавления шихты, а также на вязкость и химическую активность шлака. Основность шлака, а следовательно, и его способность к удалению из металла фосфора и серы приходится уменьшать. Выплавка коррозионно-стойкой стали с продувкой кислородом в печи, а это очень распространенная технология, становится при водоохлаждаемом своде вообще невозможной, так как хромистые шлаки особенно быстро густеют. Для борьбы с этим требуются специальные энергосберегающие решения.

Стеновые панели следует выполнять с неплотной укладкой труб. В процессе эксплуатации межтрубные интервалы и зазор между панелями и кожухом заполняются равновесным возобновляемым слоем гарнисажа. При соблюдении расчетных параметров панелей обеспечивается их высокая стойкость (не менее 12 мес. эксплуатации), экономия огнеупоров, энергосбережение и минимизация охлаждающего воздействия на процесс плавки.

Полезным решением является комбинированный свод, который сочетает огнеупорные и водоохлаждаемые элементы. В центральной части кирпич заменяют элементами охлаждения (кроме вставок вокруг электродов); периферийная часть стоит значительно лучше. Конструктивно центральная водоохлаждаемая часть свода опирается на сводовое кольцо посредством нескольких трубчатых водоохлаждаемых опор. При этом футеровка периферийной части разбивается на арочные об-

Заключение

Вопрос о преимуществах и недостатках различных типов печей и технологий необходимо решать на основе комплексного экономического анализа для условий конкретного литейного цеха.

При выборе путей модернизации плавильных отделений литейных цехов важно более осторожно пользоваться опытом эксплуатации печей устаревших или неоптимальных конструкций. Современные печи существенно модернизированы. Целесообразно сформулировать дополнительные требования специалистам (потенциальным поставщикам оборудования) и оценить убедительность их разъяснений.

Мнение отдельных зарубежных специалистов о том, что печи постоянного тока себя изжили, нельзя признать обоснованным. Оно базируется на зарубежном опыте работы ДППТ в режиме максимальной интенсификации процесса кислородом, при котором не используются такие важные преимущества ДППТ, как малый угар металла и связанное с ним пониженное пылеобразование. В нашей стране имеется положительный опыт применения ДППТ и он заслуживает широкого внедрения при строительстве новых и модернизации действующих литейных цехов.

В сфере конструирования и использования дуговых печей постоянного тока имеется много перспективных направлений дальнейшего совершенствования как в части улучшения конструкции печей, так и создания новых источников электропитания и современных систем управления.

Список литературы

1. Дибров И. А. (Президент Российской ассоциации литейщиков). Тр. седьмого съезда литейщиков России. Т. 1. ИД Историческое наследие Сибири, 2005. С. 4—13.
2. Закамаркин М. К., Беспалько В. И., Храмов В. В., Мураховский И. М. // Сталь. 2000. № 4. С. 32—34.